

---

## ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ Й УСТАТКУВАННЯ

---

УДК 621.165

**А.В. БОЙКО**, д-р техн. наук; проф. НТУ «ХПИ»;  
**Ю.Н. ГОВОРУЩЕНКО**, канд. техн. наук; с.н.с. НТУ «ХПИ»;  
**В.С. БАРАННИК**, аспірант НТУ «ХПИ»

### ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАТКИ ПРЯМОЙ ТУРБИННОЙ РЕШЕТКИ С ИЗМЕНЕНИЕМ ПРОФИЛЯ ПО ВЫСОТЕ

Рассмотрена постановка задачи пространственной оптимизации лопатки прямой турбинной решетки. Проведено верификация используемого метода расчета. Также приведены результаты оптимизации лопатки направляющей турбинной решетки, полученные с помощью варьирования геометрических параметров профиля в каждом сечении без применения тангенциального навала.

**Ключевые слова:** пространственная оптимизация, турбинная лопатка, верификация, исходная форма лопатки, оптимальная форма лопатки.

#### Введение

При постановке задачи пространственной оптимизации турбинной решетки важным является анализ влияния различных параметров, в частности, геометрических, на характер обтекания турбинных лопаток рабочим телом. В связи со сложностью поставленной задачи в работе [1] была обоснована необходимость разложения процесса оптимизации на несколько этапов. Решению начальных этапов были посвящены работы [1, 2], которые показали возможность увеличения КПД турбинного профиля при изменении его геометрических параметров. Полученные результаты позволили предположить, что постановка задачи оптимизации формы лопатки направляющей решетки по нескольким сечениям на основе 3D может дать несколько больший выигрыш по сравнению с задачей оптимизации лопатки с постоянным по высоте профилем. Оптимизации турбинной лопатки в данной постановке посвящено следующее исследование.

#### Постановка задачи оптимизации

Пространственная оптимизация лопатки паровой турбины подразумевает изменение геометрической формы профиля лопатки в каждом ее сечении или на определенном участке, который с точки зрения аэродинамики является наихудшим. Анализ ранее проведенных работ показал, что варьирование параметров профиля лопатки в каждом сечении является достаточно трудоемкой задачей и выдвигает серьезные требования к характеристикам вычислительной техники. В связи с этим было принято решение несколько упростить задачу оптимизации. Новая постановка задачи включает поиск оптимальных сочетаний варьируемых параметров в ядре потока и на торцах лопатки.

Исходя из выше изложенного, возможны следующие способы поиска оптимальной формы лопатки:

1) Поэтапная оптимизация, включающая:

а) оптимизацию профиля с функцией цели – профильные потери. Данный профиль располагается в ядре потока;

б) на основании результатов, полученных на предыдущем этапе, оптимизация профилей в приторцевых областях.

2) Одновременный подбор оптимальных параметров профилей в ядре потока и в приторцевых областях.

---

© А.В. Бойко, Ю.Н. Говорущенко, В.С. Баранник, 2013

В данной статье рассмотрен вариант одновременного варьирования параметров профиля лопатки в выбранных сечениях.

Цель исследования – повышение аэродинамической эффективности лопатки плоской турбинной решетки при заданных граничных условиях с сохранением расхода рабочего тела через решетку и площади профиля в каждом сечении лопатки.

Объект исследования – плоская турбинная решетка, соответствующая по своей геометрии второй ступени турбины К-310-23.5. Основные геометрические параметры данной решетки приведены в работе [1].

Построение пера исходной лопатки и оптимального варианта выполнено в программе *TopGrid*, в которой осуществлено построение расчетных сеток и их экспорт во внешние *CFD* решатели. Параметрическая модель исходного профиля приведена в работе [2].

Функция цели – интегральные потери. В качестве исходного профиля был выбран профиль направляющего аппарата ТС-1А.

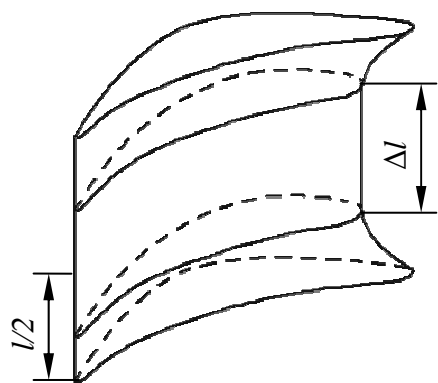


Рис. 1 – Лопатка прямой турбинной решетки с переменным по высоте профилем

Так как рассматриваемая решетка прямая, оптимальная форма лопатки симметрична относительно средней по высоте лопатки линии решетки. С учетом этого за варьируемые параметры были приняты: на средней линии решетки по высоте –  $\alpha_{yc}$  – угол установки профиля,  $\alpha_{lrc}$  – геометрический угол выхода потока,  $\delta_c$  – угол отгиба выходной кромки,  $\omega_{0c}$  – угол заострения входной кромки,  $\omega_{1c}$  – угол заострения выходной кромки; на торцевых поверхностях –  $\alpha_{yt}$  – угол установки профиля,  $\alpha_{lgt}$  – геометрический угол выхода потока,  $\delta_t$  – угол отгиба выходной кромки,  $\omega_{0t}$  – угол заострения входной кромки,  $\omega_{1t}$  – угол заострения выходной кромки; а также  $\Delta l$  – длина участка, на

котором профиль не изменялся, взятая в процентном соотношении от общей высоты лопатки  $l$  (рис. 1).

Во всех расчетах приняты следующие граничные условия: полное давление на входе – 16,15 МПа; полная температура на входе – 457,54 °С; статическое давление на выходе – 13,72 МПа; степень турбулентности потока на входе – 1 %;  $M_t = 0,49$ ;  $Re = 1,1 \times 10^5$ ; модель турбулентности –  $k-\omega$  SST; расчетная схема TVD второго порядка аппроксимации с локально первым в местах больших градиентов;  $y^+ < 1$ ; схема задания граничных условий на поверхностях расчетной области и расстояние плоскости замера искомых параметров соответствуют изложенным в работе [1].

Оптимизационный подход – теория планирования эксперимента и ЛП<sub>т</sub> – поиск по алгоритму, представленному в работе [2]. Для повышения точности формальной макромоделей и уменьшения количества итераций при поиске оптимальной формы лопатки использовался метод замены суперпозиции парабол на суперпозицию сплайнов [3].

### Верификация метода расчета

Наиболее эффективным способом определения реального характера течения в турбинных решетках является физический эксперимент. Однако, проведение эксперимента требует значительных материальных затрат и поэтому в настоящее время широкое применение получили методы вычислительной аэродинамики.

При использовании метода вычислительной аэродинамики большое внимание уделяется способности данного метода описывать реальный характер течения в интересующем нас объекте исследования. Исходя из этого, была проведена верификация взятого за основу метода расчета.

За экспериментальные данные приняты результаты продувок турбинного профиля ТН-2 [4]. Параметры потока при расчете следующие: перепад давления на решетку  $\Delta P = 1300$  мм.вод.ст., температура рабочего тела на входе  $t_0 = 20$  °С,  $Re = 4 \times 10^5$ ,  $M_T = 0,4$ . Размеры участков, имитирующих отсечные пластины, выбраны в соответствии с экспериментом. Расчетная сетка: входной участок  $40 \times 40 \times 40$ , межлопаточный канал  $166 \times 72 \times 62$ , выходной участок  $166 \times 72 \times 62$ . Контрольная плоскость при замерах полученных результатов располагалась на расстоянии 10 мм от фронта решетки.

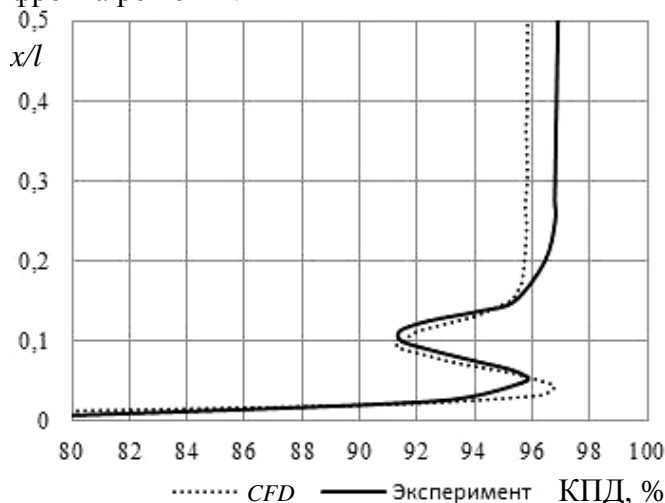


Рис. 2 – Распределение КПД по высоте лопатки

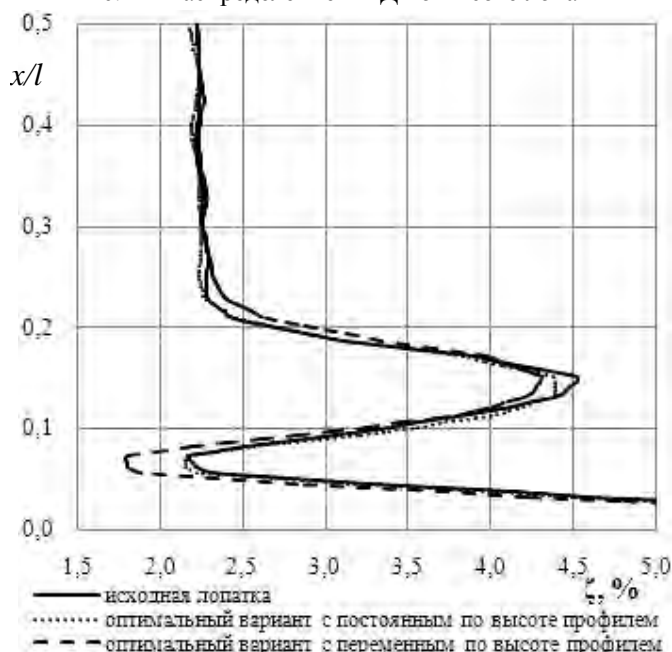


Рис. 3 – Распределение потерь по высоте лопатки

В данном случае сравнение производилось по распределению КПД по высоте решетки. На рис. 2 приведены результаты численного расчета и натурального эксперимента. Как видно из рис. 2, данные *CFD* расчета хорошо совпадают с экспериментом в области вторичных течений, при этом, некоторые расхождения наблюдаются в определении профильных потерь. При постановке задачи оптимизации данную погрешность будем принимать как систематическую ошибку расчета.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что принятый метод вычислительной аэродинамики позволяет с приемлемой точностью отображать реальную картину течения в турбинных решетках.

### Результаты оптимизации

Сравнение результатов, полученных при оптимизации в данной постановке, будем проводить с исходным вариантом и полученными ранее результатами оптимизации лопатки, имеющей постоянный по высоте профиль.

На рис. 3 приведено распределение КПД по высоте лопатки для оптимальных форм лопаток с постоянным и переменным

по высоте профилем, а также исходного варианта. Как видно на рис. 3, оптимизация турбинной лопатки с постоянным по высоте профилем позволила уменьшить потери

только в ядре потока. При этом область вторичных течений, которая в лопатках малой высоты существенно влияет на величину интегральных потерь, осталась неизменной.

Оптимизация лопатки по высоте проводилась из соображений уменьшения потерь, как в ядре потока, так и в области вторичных течений. Однако, анализ полученных результатов показал, что оптимальный вариант лопатки с переменным по высоте профилем имеет уровень профильных потерь, что и исходный вариант, но позволяет уменьшить долю вторичных течений.

Численные значения функции цели и функциональных ограничений, полученных при оптимизации, приведены в табл.

Таблица

Результаты оптимизации

Лопатка	Исходный вариант	Оптимальный вариант	
		с постоянным по высоте профилем	с переменным по высоте профилем
Интегральные потери $\xi_{\text{инт}}$ , %	2.936350	2.891290	2.877550
Расход $G$ , кг/с	2.013110	2.012820	2.012550
Площадь $F_c$ , мм	0.000322	0.000349	0.000379
Площадь $F_k$ , мм	0.000322	0.000349	0.000322

Как видно из табл., оптимизация с помощью варьирования формы профиля в заданных сечениях позволила получить форму лопатки, интегральные потери которой на 0,477 % в относительных величинах меньше оптимального варианта с постоянным по высоте профилем и на 2,043 % меньше потерь исходного варианта. При этом, с приемлемой точностью выдержан расход рабочего тела и площадь поперечного сечения профиля.

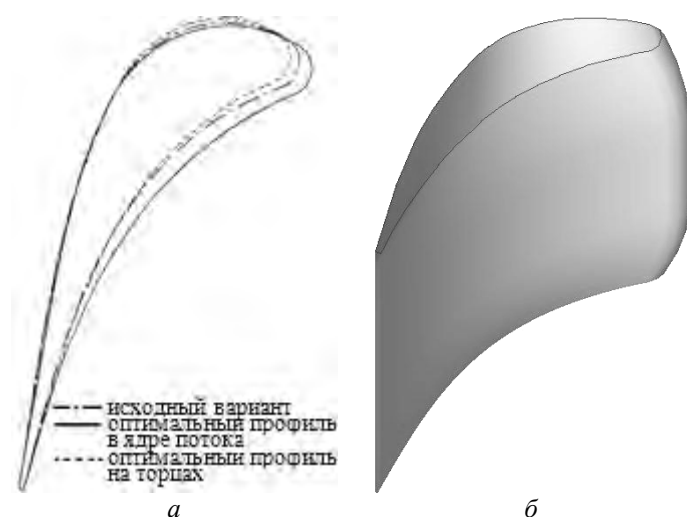


Рис. 4 – Оптимальная форма турбинной лопатки:  
а – форма профиля; б – пространственная форма лопатки

Для наглядности, на рис. 4 приведена пространственная форма полученной лопатки и формы профиля в оптимизируемых сечениях.

Как видно из рис. 4 формы профиля оптимальной лопатки в ядре потока и на торцевых поверхностях существенно отличаются. При этом, площадь поперечного сечения лопатки в ядре потока выше чем на торцах, что не согласуется с некоторыми работами других исследователей по данному вопросу.

На рис. 5 отчетливо видны аэродинамические эффекты,

приведенные на рис. 3. Как видно из рис. 5, оптимизация лопатки по высоте позволила уменьшить как величину вихря, образующегося от перетекания пограничного слоя на торцах решетки, так и толщину пограничного слоя под ним.

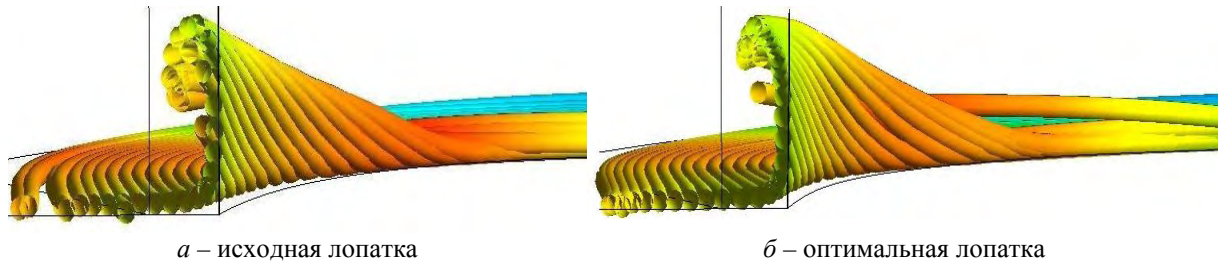


Рис. 5 – Сход подковообразного вихря в приторцевой областях исходной и оптимальной лопаток

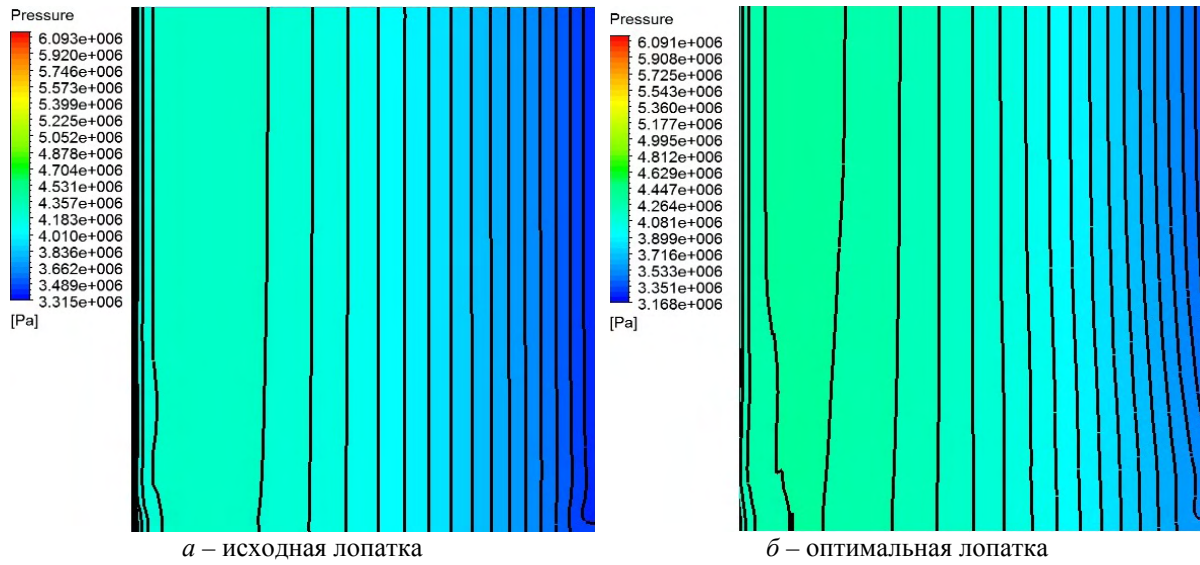


Рис. 6 – Контуры статического давления в горле межлопаточного канала

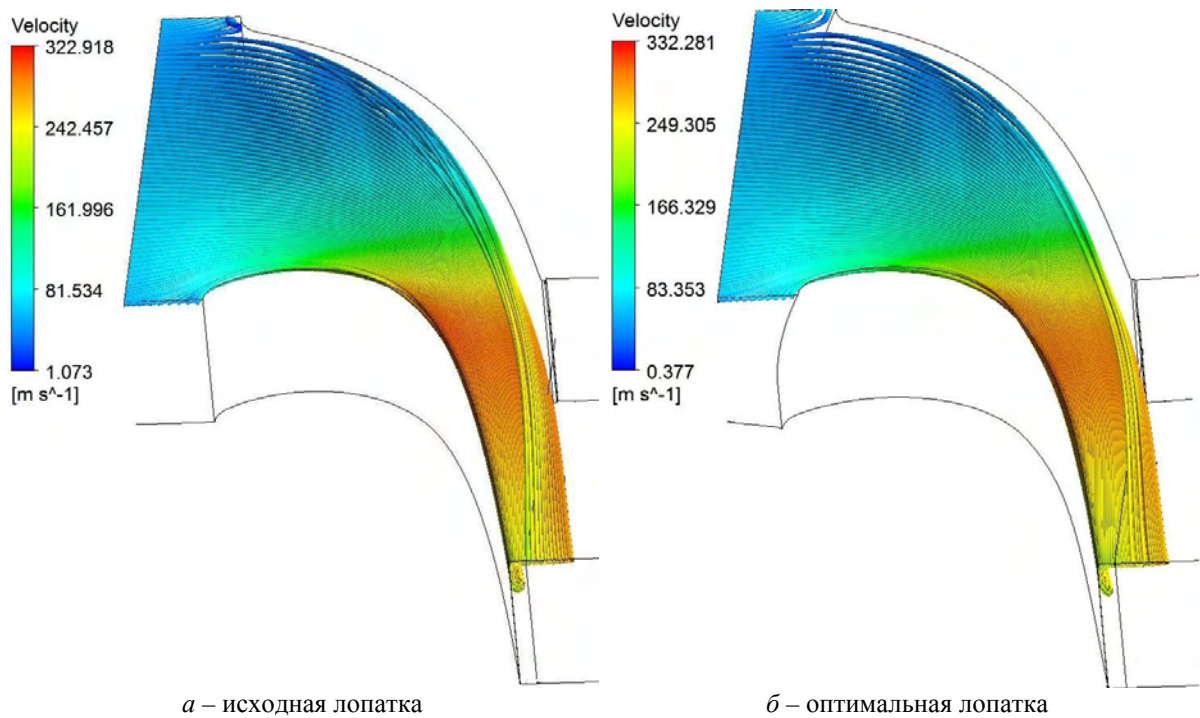


Рис. 7 – Линии тока в приторцевой области канала

Данный эффект был достигнут благодаря уменьшению в оптимальном варианте перепада давления между сторонами давления и разрежения в приторцевой области, что можно видеть по характеру распределения статического давления по высоте исходной и оптимальной лопатки в горле решетки.

Из рис. 7 видно, что изменение распределения статического давления приводит к уменьшению перетеканий в приторцевой зоне и, как следствие, к уменьшению величины потерь от вторичных течений.

### Выводы

1 Проведенное сравнение результатов численного и физического экспериментов показало возможность используемого метода расчета достаточно точно отображать реальную картину течения в турбинных решетках.

2 Пространственная оптимизация турбинной лопатки по используемой методике позволила получить форму лопатки, интегральные потери которой меньше не только по сравнению с исходным вариантом, но и с оптимальной формой лопатки при постоянном по высоте профиле.

3 С помощью применения различных форм профилей в ядре потока и на торцах канала возможно не только уменьшить величину вихря, образующегося от перетекания пограничного слоя, но и толщину пограничного слоя под ним.

**Список литературы:** 1. Бойко, А.В. Пространственная оптимизация профиля лопатки прямой турбинной решетки [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, М.В. Бурлака, В.С. Баранник // *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Вісник НТУ «ХПІ». 36. наук. праць. – Х.: НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 6-10. – ISSN 2078-774X. 2. Бойко, А.В. К вопросу об оптимизации формы плоских турбинных профилей [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, М.В. Бурлака, В.С. Баранник // *Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование*. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – № 5. – С. 51-54. – ISSN 2078-774X. 3. Бойко, А.В. Повышение точности формальной макромодели при планировании эксперимента [Текст] / А.В. Бойко, А.П. Усатый, В.С. Баранник // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 12(986). – С. 5-9. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. 4. Федоров, М.Ф. Экспериментальное исследование КПД в решетках профилей типа ТН-2: отчет по НИР № 289 / М.Ф. Федоров. – Х.: НТУ «ХПИ», 1957.

*Поступила в редколлегию 10.02.13*

УДК 621.165

**Пространственная оптимизация лопатки прямой турбинной решетки с изменением профиля по высоте** [Текст] / А.В. Бойко, Ю.Н. Говорушенко, В.С. Баранник // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 14(988). – С. 5-10. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X.

Розглянута постановка задачі просторової оптимізації лопатки прямої турбінної решітки. Проведена верифікація методу розрахунку, що використовується. Також приведені результати оптимізації лопатки напрямної турбінної решітки, отримані за допомогою варіювання геометричних параметрів профілю в кожному перерізі без використання тангенціального навалу.

**Ключові слова:** просторова оптимізація, турбінна лопатка, верифікація, початкова форма лопатки, оптимальна форма лопатки.

The formulation of the problem of the spatial direct row blade optimization was considered. The verification of the using calculation method was performed. Also the results of the turbine guide row blade optimization that obtained by changing the geometrical parameters of profile in each section of blade without tangential bulk are showed.

**Keywords:** spatial optimization, turbine blade, verification, initial blade form, optimal blade form.